

防音材料適用最適化技術の開発

Sound Packaging Optimization in Automobiles Using Simulation Method

小 峰 徳 雄*
Tokuo Komine

前 田 孝 司*
Takashi Maeda

山 下 剛*
Tsuyoshi Yamashita

中 村 光 勇*
Mitsuo Nakamura

要 旨

近年、車体の軽量化に対する要求が高まる中で、車室内騒音低減を目的とした防音材料については、最小限の使用量で要求される騒音レベルを達成できる効率的な適用が望まれている。

そこで、限られた重量、コストの中で最高性能を有する防音仕様を、シミュレーションにより短期間で決定できる防音材料適用最適化手法を確立した。この最適化手法は、車室内の各面から放射される音響パワー寄与率分析手法、防音材料性能データベースおよび車室内騒音予測シミュレーションソフトウェアより構成される。さらに防音材料を実車に適用するうえで考慮すべき施工上の性状パラメータを導入したことにより、高い精度で防音効果が予測可能となった。

本稿では、本手法の防音効果予測アルゴリズム、最適化手法の流れについて述べ、さらに本手法を実車のロードノイズ改善に適用し、その有効性を確認したので、その内容を報告する。

ABSTRACT

As the needs for lightweight car bodies mount over time, cabin noise materials are to become such that their minimal use will achieve the required noise level.

This approach aims toward using computers to optimize noise control specifications that will achieve maximum effectiveness with limited material cost and weight. This process comprises the following: 1) the analysis on the contribution of sound emission generating from various parts of the cabin to the total sound energy; 2) a database of the function properties of noise control materials; and 3) cabin noise prediction software. In addition, this process employs parameters of material properties at the time of their fitting to the car during production. Thus it is possible to predict with high accuracy the effectiveness of materials used in noise control.

This report introduces the algorithm for predicting the effectiveness of noise control and the process for optimizing sound packaging, together with its application to the improvement of the road noise level during development and its effectiveness as a result.

1. はじめに

車体の軽量化は、「低燃費」と「走り」に対する有効な対応策であり、近年ますますその要求が強くなっている。車室内騒音低減を目的とした防音材料は、その適用重量と得られる騒音低減効果に強い相関があることから、軽量化に対しては相反する要素ともなっている。しかしながら、車室内の音響的性状を十分把握したうえでその性状に

合致した特性をもつ防音材料を必要量のみ適用すれば、車体の軽量化の可能性がある。

従来、自動車の防音材料仕様は、完成車を用いて各部位ごとの防音材料仕様別テストを繰り返して行い、得られる騒音低減効果をもとに、重量、コストを加味したうえで総合的に判断し決定されていた。この手法では、当然のことながら、完成車での防音材料仕様別テストに膨大なテスト工数が

* 栃木研究所

費やされるため、最終的な防音仕様を決定するまでに長いテスト期間を必要とするという欠点があり、また、最終的に決定した防音仕様が最適であるのか不明確な点もあった。

今回、最適防音設計の観点から、車に適用される全ての防音材料仕様、すなわち防音パッケージについて実車の音響性能、重量、コストを予測できるシミュレーションソフトウェアを開発し、それを用いた防音仕様の最適化手法を確立したので、その概要について報告する。

2. 防音性能予測手法

防音材料は、制振、遮音、吸音材料に大別され、各々機能面から使用目的が分けられている。このうち、制振材料は、エンジン、路面などの起振源からボディに振動伝達され各パネル面から放射される固体伝播音の対策に、遮音、吸音材料は、車室内に音響的に透過してくる空気伝播音の対策に用いられるのが一般的である。

防音材料は、図1に示すように周波数により騒音低減効果が異なることから、その適用にあたっては車室内の音響的性状を十分把握し、その部位と目的に適した防音材料仕様を検討する必要がある。そこで本最適化手法では、実車の音場特性および実車適用時の各防音材料の音響性能を十分に把握、考慮した上で、任意の防音パッケージの防音性能を精度良く予測計算し、加えて遮音、制振、吸音の3材料について総合的に最適な防音仕様を決定できることを最終目標とした。

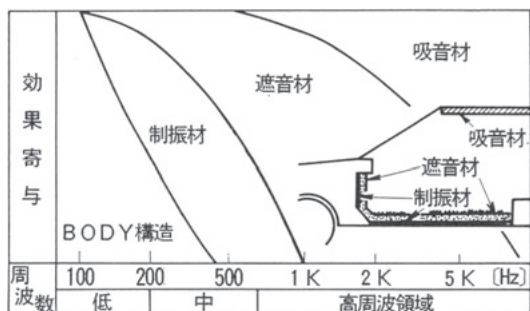


図1 防音材料の効果的な騒音低減周波数領域

本手法は図2に示すように、車室内各面の放射音響パワー寄与率分析手法、防音材料データベースおよび、それらを用いた車室内騒音予測シミュレーションソフトウェアから構成され、以下にこれらの内容について述べる。

2.1. 遮音、制振材料

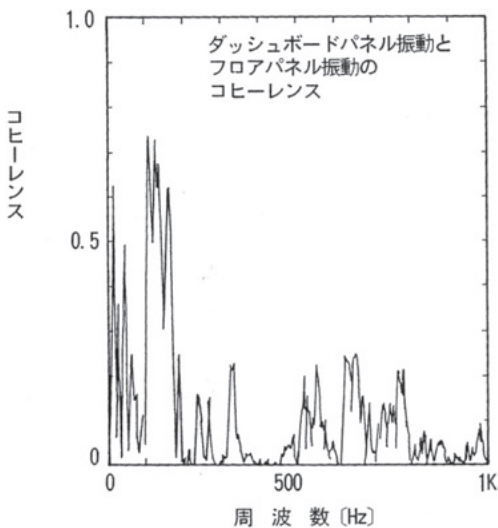
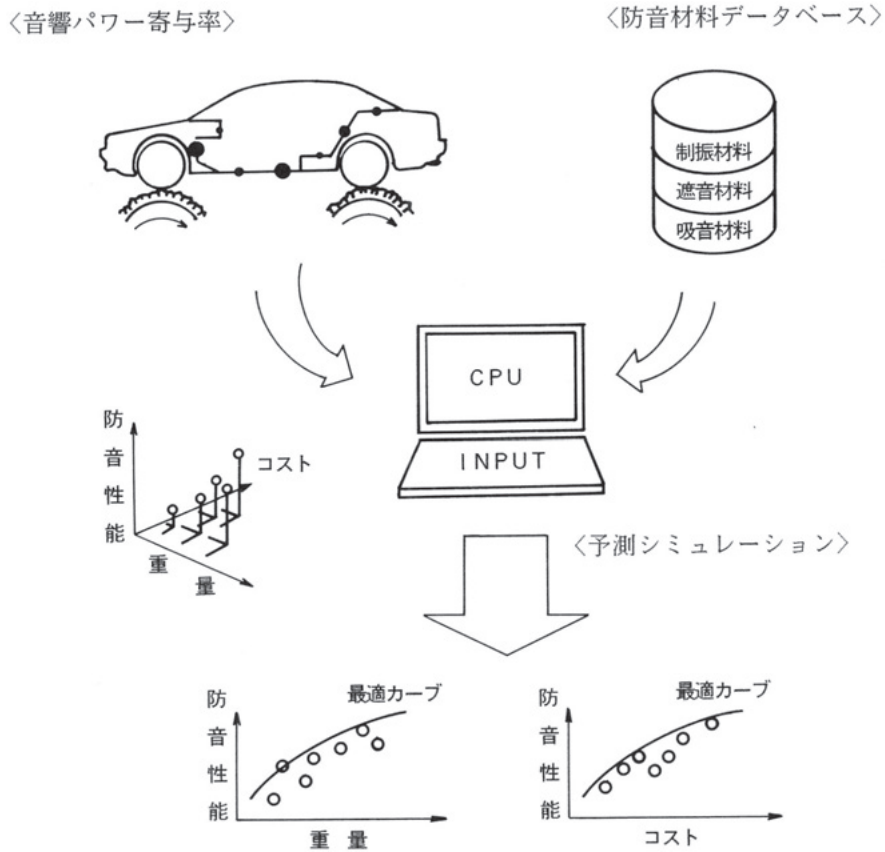
(1) 車室内音場特性

車室内音場は、基本的には車室内表面から放射、あるいは透過してくる音によって形成される。しかし、車室内騒音は周波数帯域によってその発生メカニズムが若干異なる。このうち、比較的周波数の低い領域においてはボディ骨格全体の振動が各パネルを励振させるため、それぞれのパネル放射音には相関があり、乗員耳位置の音圧レベルは、各パネルから発生する音のベクトルの和、すなわち位相を考慮した形で求めることができる。一方、比較的高い周波数領域においては、局所的なパネルの振動に起因して放射される音とエンジンルームなどで発生した音がパネルを透過してくる音によって車室内音場が形成されるため、それぞれの放射音は無相関と考えられる。図3に各パネル振動の相関性を表わす一例として、ダッシュボードパネル振動とフロアパネル振動のコヒーレンスを実車走行にて測定した結果を示す。この結果より200 Hz以上の周波数領域においてはコヒーレンスが比較的低く、それぞれのパネル振動すなわち放射音がほぼ無相関であることがわかる。したがって、このような周波数領域での車室内騒音は各面から放射される音のスカラ和、すなわち位相を考慮しないエネルギー和で表すことができる。

(2) 車室内音響パワー寄与率分析手法

一般に自動車に用いられる防音材料の効果的な騒音低減周波数域は比較的高く、およそ200 Hz以上であり、こうした周波数域においては先に述べたように、車室内各表面から放射される音が無相関であることから、各面から放射される音響パワーが乗員耳位置の音圧レベルに対してどの程度の寄与を持つのかを、位相を考慮せずに分析できる。

今回は、その寄与率分析手法として、ガラス面等を除いた各面(評価対象面)を高重量防音材料で覆い、そこから発生する音響パワーを最小限に



抑えた完全防音施工状態から、防音材料を一面一面除去し音響パワー寄与率を求める方法、いわゆるマスキング法を用いた。マスキング法では、図4に示すように、車室内各面に防音材料がまったく施工されていない状態での車室内音 P_{BA} 、完全防音施工状態での車室内音 P_{MA} 、そして完全防音施工状態から、 i 面のみ防音材料を未施工状態にしたときの車室内音 P_{Si} を測定し、それらを用いて、非評価対象面の音響パワー寄与率 L_0 、各評価対象面の音響パワー寄与率 L_i を次式にて算出する。

$$L_0 = \frac{P_{MA} / P_{BA} - \gamma_{MAX}}{1 - \gamma_{MAX}} \quad (1)$$

$$L_i = \frac{P_{Si}/P_{BA} - P_{MA}/P_{BA}}{1 - \gamma_{MAX}} \quad (2)$$

ここで、 γ_{MAX} :完全防音施工をおこなった防音材料の防音性能

(3) 予測アルゴリズム

車室内表面に遮音、制振材料を適用したときの車室内騒音の低減レベル ΔP_{INS} は、式(1)(2)を用いて求めた各周波数ごとの音響パワー寄与率 L_0 、 L_i および適用した防音材料の実車防音性能 γ^* を用いて算出することができ、次式で表される。

$$\Delta P_{INS} = 10 \log(L_0 + \sum_{i=1}^N \gamma^* \cdot L_i) \quad (3)$$

ここで、 N :評価対象面の数

(4) 防音材料の実車防音性能

実車における防音材料の防音性能は、防音材料の施工方法、車体のパネル構造などの影響を大きく受ける。そこで、式(3)で用いられる防音材料の実車防音性能 γ^* は、3章で述べるデータベース化された防音材料の単体防音性能に加えて、以下に示すように、それぞれの実車適用時に考慮すべき施工上の性状パラメータを導入して決定した。

① 遮音材料

自動車に遮音材料を適用する場合、例えばダッシュボードに代表されるようにワイヤハーネスなどを通してさせるための穴部が存在し、これらの穴部あるいは端末部からの音漏れが、遮音性能を低下させる要因となるため、それらを遮音材料の性能データ上で考慮する必要がある。そこで、本シミュレーションでは、穴部などからの音漏れによる透過損失の低下を、穴部と穴部以外の面積比を用いて次式で表し、遮音材料の実車防音性能 γ^* とした。

$$\gamma^* = R + \gamma \cdot (1 - R) \quad (4)$$

ここで、 R :穴部の開口比

γ :データベース化された遮音材料の単体防音性能

穴部を有する遮音材料の防音性能について、式(4)を用いて求めた計算値と実験値を比較した結果を図5に示す。両者は非常に良く一致し、式(4)によって求めた計算結果を遮音材料の実車防音性能として用いることができる。

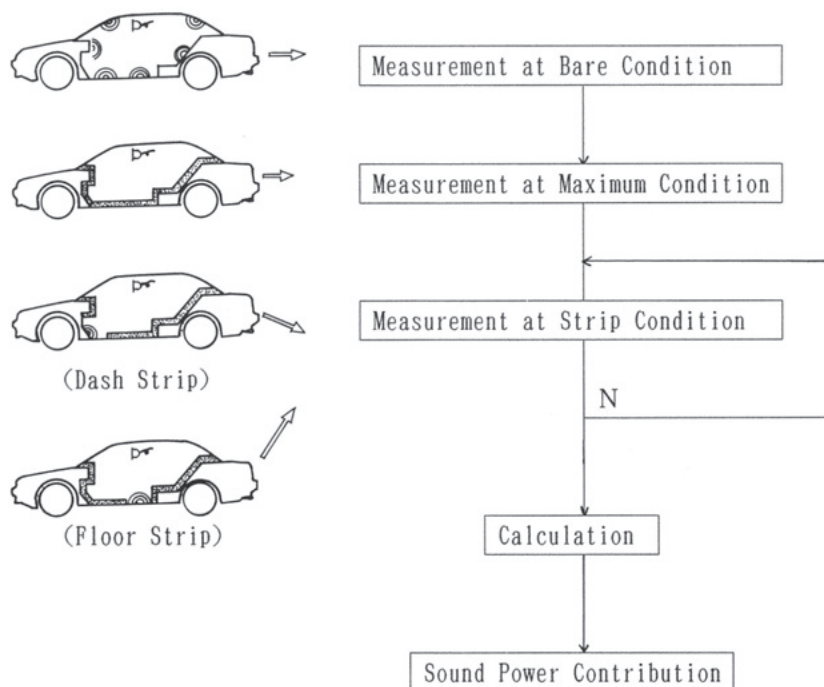


図4 マスキング法による音響パワー寄与率分析手法

② 制振材料

一般に制振材料の防音効果は、適用部位のパネル剛性に大きく影響される。すなわち剛性の異なるパネルに同一の制振材料を適用したとしても、その制振効果は剛性の高いパネルでは小さく、剛性の低いパネルでは大きい。その影響を制振材料の実車防音性能の中に考慮するため、本手法ではパネルの制振されやすさを表す係数 W を導入し、実車防音性能 γ^* を次式を用いて表した。

$$\gamma^* = W \cdot \beta \quad (5)$$

ここで、 β : データベース化された基準剛性パネルにおける制振材料の単体防音性能

W とパネル剛性 K の関係は、種々の実車を用いてパネル剛性と基準の制振材料を施工した場合の制振効果を測定し、その結果から図 6 に示するような関係曲線として実験的に定義した。

したがって、シミュレーションに用いられる W は、供試車の各パネルの剛性測定結果から決定される。

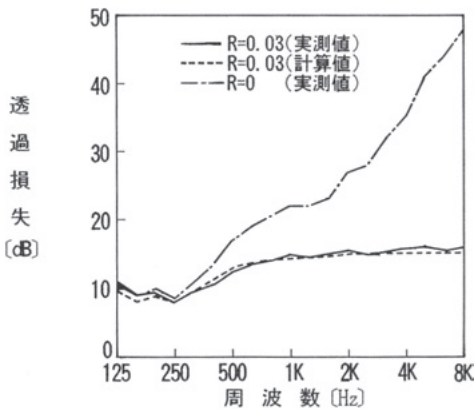


図 5 遮音材料の防音性能におよぼす穴部の影響

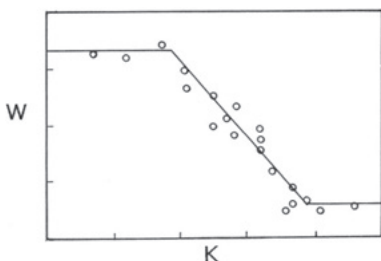


図 6 パネルの制振されやすさを表す係数 W とパネル剛性 K の関係

2.2. 吸音材料

(1) 基本アルゴリズム

吸音材料適用による車室内の音圧低減効果は、車室内に侵入する音を低減するのではなく車室内表面での反射音を低減することによって得られることから、その効果予測アルゴリズムは、前述の遮音、制振材料の場合とは異なる。以下に、そのアルゴリズムを示す。

車室内を拡散音場と仮定すれば車室内音圧 P は、一般にコンサートホールなどの大きな音響空間の設計に用いられる幾何音響理論より導かれ、次式で求めることができる。

$$P = P_w + 10 \log \frac{4(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha} \cdot S_T} \quad (6)$$

ここで、 P_w : 車室内に侵入する音響パワー

$\bar{\alpha}$: 車室内平均吸音率

S_T : 車室内総表面積

式(6)より、吸音処理前後の車室内平均吸音率をそれぞれ $\bar{\alpha}_0$ 、 $\bar{\alpha}_1$ とすれば、車室内総吸音力向上によって生ずる音圧低減レベル ΔP_{DIF} は

$$\Delta P_{DIF} = 10 \log \frac{\bar{\alpha}_0(1-\bar{\alpha}_1)}{\bar{\alpha}_1(1-\bar{\alpha}_0)} \quad (7)$$

で算出される。

車室内平均吸音率 $\bar{\alpha}$ は、適用した吸音材料の吸音率と施工面積から次式にて求めた。

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i}{S_T} \quad (8)$$

ここで、 α : データベース化された吸音材料の吸音率

S : 吸音材料の施工面積

(2) 近接効果

乗員耳位置に比較的近い車室内表面、例えばルーフライニング、ピラー、パーセルシェルフ等の内装部品に吸音処理を施すことは、車室内の総吸音力向上に伴う音圧低減効果だけでなく、吸音材料の直接的な影響による音圧低減効果をもたらす。

このため本シミュレーションでは、吸音材料適用による音圧低減効果の予測精度を高めるために、この効果を実験的に定義し、吸音材料の近接効果として追加補正した。

この近接効果 ΔP_{PRO} は、吸音率 1 の無限平板近傍における音圧低減効果 ΔP_{INF} を距離の関数

として定義し、さらに図7に示すように乗員耳位置と吸音材料の位置関係および吸音面の大きさから求まる幾何学的ファクタCを考慮して、次式で算出した。

$$\Delta P_{PRO} = \sum_{i=1}^{N_A} (C_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta P_{INF}(\delta_i)) \quad (9)$$

ここで、 δ : 乗員耳位置と吸音面間の距離

N_A : 近接効果を考慮しなければならない吸音面の数

よって最終的に車室内の吸音処理によってもたらされる音圧低減レベル ΔP_{ABS} は、吸音力向上による効果と近接効果を合わせて次式で表される。

$$\Delta P_{ABS} = \Delta P_{DIF} + \Delta P_{PRO} \quad (10)$$

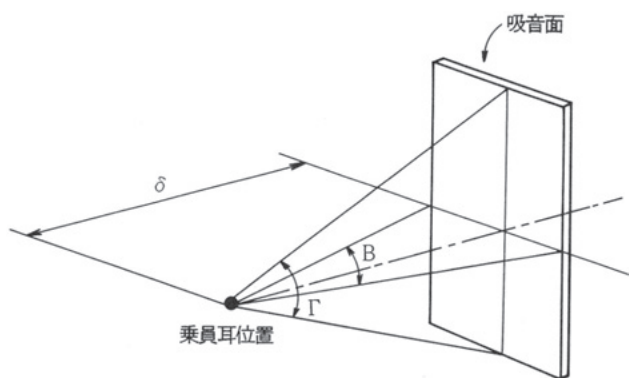


図7 乗員耳位置と吸音面の幾何学的関係

2.3. 防音材料の統合防音効果

任意の防音パッケージに対する音圧低減レベル ΔP_T は遮音、制振、吸音材料適用による音圧低減効果を統合して次式で表される。

$$\Delta P_T = \Delta P_{INS} + \Delta P_{ABS} \quad (11)$$

また音圧レベルの絶対値 P_{SIM} は、寄与率分析を行う際の裸状態の音圧レベル P_{BA} および ΔP_T から求めることができ次式で表される。

$$P_{SIM} = P_{BA} + \Delta P_T \quad (12)$$

また防音材料のデータベースとして、材料の防音性能だけでなく単位面積当たりの重量、コストをデータ化しておくことにより、その防音パッケージ全体の重量およびコストを計算できる。

3. 防音材料データベース

本シミュレーションに用いられる防音材料データベースは、遮音、制振、吸音の3材料データより構成され、一般に車室内に適用される範囲内で材料の種類、厚さを、様々に変えた仕様についてデータ化されている。また、おのこのデータは、周波数ごとの防音性能（遮音： γ 、制振： β 、吸音： α ）および単位面積当たりの重量、コストから構成される。

3.1. 性能データ作成法

防音材料の音響性能は、一般に単体特性値を用いて表される。例えば、遮音材料の場合、透過損失であり、制振材料の場合は、損失係数が一般的である。一方、実車における防音性能は、必ずしもこうした単体特性値と一致しない場合がある。

このため、本データベースの防音性能データは、表1に示す単体テストおよび実車テストから得られたデータを組み合わせることによって、すなわち実車テストにより得られた実車性能データを、あらかじめ実車テストとの相関性が確認されている単体テストによって求めた単体性能データを用いて相対的に補間、補正するという方法で作成される。したがって、このデータベースの大きな特長は、防音性能データの精度が極めて高いことであり、これもシミュレーションの総合精度を高めているひとつの要因である。

3.2. コスト算出

データベース内にデータ化されている材料のコストには、それぞれの材料の材料費だけでなく、各防音部品を製造する上での諸費用なども含まれており、シミュレーションにより計算されたコストは、その防音パッケージの実コストとして表現される。ただし、計算した防音パッケージのコストと量産時の実コストとは若干の差異を生じる場合があるが、最適防音パッケージを決定する上で重要である各防音パッケージ間の相対コストは十分な精度が確保されている。

3.3. データベースの補間

本防音材料データベースでは、厚さについて段

表 1 防音材料の防音性能評価手法

防音材料	周波数	単体テスト	実車テスト
遮音材料	中周波 (200-500Hz)	鋼球加振テスト	ラフローラ上での 振動加振テスト
	高周波 (500-10kHz)	スピーカ加振テスト	スピーカによる 音響加振テスト
制振材料	中高周波 (200-10kHz)	フレーム加振テスト スピーカ加振テスト	ラフローラ上での 振動加振テスト
吸音材料	中高周波 (200-10kHz)	残響室法吸音率測定	

階的な仕様、例えば10 mm、20 mm、30 mmという仕様についてのみデータ化している。しかしながら実用においてはスペース等の都合で、これらの中間的な厚さを設定しなければならない場合が多くあり、このような場合には、性能、重量、コストの3軸についての線形的な補間が自動的に行われる。その結果、任意厚さの防音材料データをシミュレーションに用いることが可能となり、より高いシミュレーション精度を確保している。

4. シミュレーションの精度

本シミュレーションの精度を検証するために、実車を用いて防音パッケージの最適化を行い、車室内騒音低減効果の予測値と実測値を比較した。図8に、台上試験における車室内騒音の比較結果を示す。両者は±1 dB以内の精度で一致しており、本シミュレーションの精度が極めて高いことがわかる。

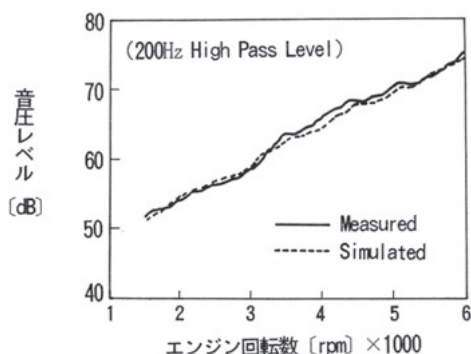


図8 車室内騒音の実測値と計算値比較

5. 最適化フローと実車適用例

防音材料の最適パッケージは、前述したマスキング法により車室内各面の放射音響パワーの寄与率分析をした後、その結果をもとに最適化シミュレーションソフトウェア、および防音材料データベースを用い決定される。この最適化手法の流れを図9に示し、詳細を以下に述べる。

5.1. 最適化フロー

最適化シミュレーションは、材料のもつ防音特性の違い、から大きく中周波領域(200-500 Hz)と高周波領域(500-10KHz)に分けて、それぞれの帯域ごとに実行される。このうち、中周波領域の音に対しては、その発生メカニズムとして固体伝播音成分が多くを占めていることから、制振材料による最適化シミュレーションを実行する。制振材料は、前述したように適用する面の剛性により得られる騒音低減効果が異なることから、予め評価対象面のパネル剛性を測定し図6よりWを求め、実車のもつ性状パラメータを決定する。一方、高周波領域の最適化は、主として透過音の低減を目的とし遮音材料最適化ソフトを用いる。遮音材料は、前述したように施工上の音響特性として適用部位に対する穴部に対する開口率を入力した後、騒音低減効果を測する。

防音材料の最適化とは、音響的には各評価対象面から放射される音響パワーを均一化させることである。従ってこれら制振、遮音材料最適化ソフトを用い、各部位の音響パワー寄与率が均一化するまで、適用すべき防音材料をデータベースから

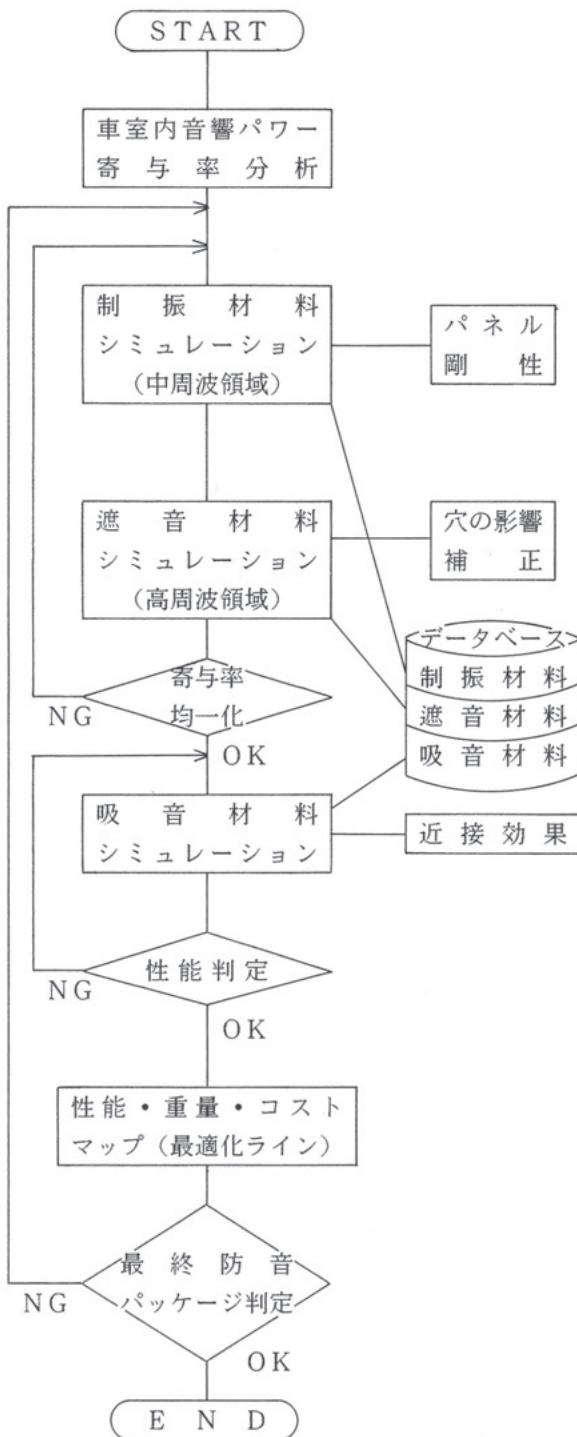


図9 最適化シミュレーションのフローチャート

抽出し予測計算を繰り返し実行する。

このように制振、遮音材料の最適化を行った後、吸音材料最適化ソフトを用い、高周波領域の車室内騒音の改善を目的として、騒音低減効果を予測する。その結果、最終的に制振、遮音、吸音材料に対する最適防音パッケージが設定される。

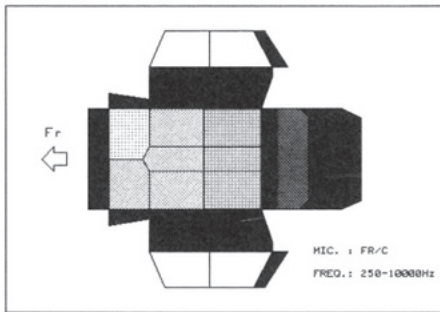
5.2. 実車適用例

最適化シミュレーションソフトウェアを用い、ロードノイズに対する防音材料の最適化を行った。その一例を以下に述べる。図10は、前述の寄与率分析手法をもとに、初期の防音パッケージに対する前席中央位置での車室内音響パワーの寄与率を予測した結果である。寄与率は評価対象面を展開図として、色の濃淡で寄与度を視覚的に表示しており、色の濃い面は寄与の大きいことを示している。この結果より、ロードノイズに対する各面の寄与率は、ダッシュボード上部、ドアライニング前側の寄与が大きく、その反面ダッシュパネルからフロアにかけて比較的寄与が小さいことがわかる。そこで、この寄与の小さい部位の防音材料を削減し、その削減した防音材料の重量、コスト分の材料を寄与の大きい部位へ適用し、最終的にバランスのとれた材料配置とする。

本実施例では、初期の防音パッケージとしてダッシュパネルからフロアに適用していた制振材料を削減し、その重量分の遮音材料を寄与の大きいダッシュボード上部、ドアライニング前側に分散させ、車室内各面の音響パワー寄与率が均一化するまで防音材料の種類や厚み等を変え予測計算を繰り返し行った。図10の右図に最適化された音響パワー寄与率分析の結果を示す。各面から放射される音響パワーが均一化されていることがわかる。その後、吸音材料最適化ソフトを用いルーフライニング、ピラーなどの内装部品に吸音性能をもたせた時に得られる騒音低減量を予測した。その結果を図11に示す。この結果からわかるように、吸音ルーフライニング及びピラーの吸音処理により、20KHz以上の高周波領域にて2dB以上の騒音低減量を得られることが予測できる。

これらの予測結果から、最終的に図12に示すように各防音パッケージの重量、コストに対する騒

〈初期防音パッケージ〉



〈最適防音パッケージ〉

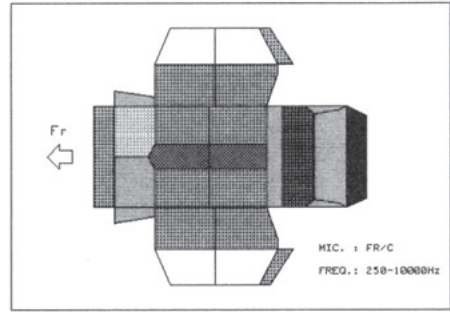


図 10 車室内音響パワー寄与率分析

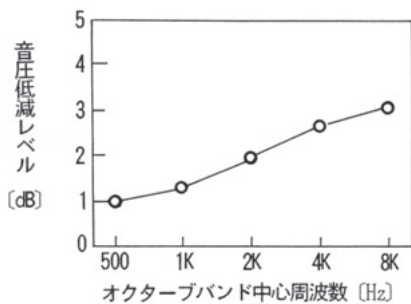


図 11 吸音材料適用時の騒音低減効果予測

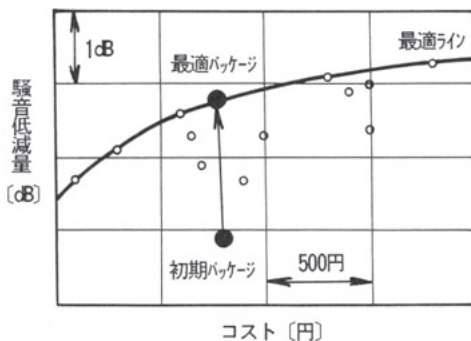
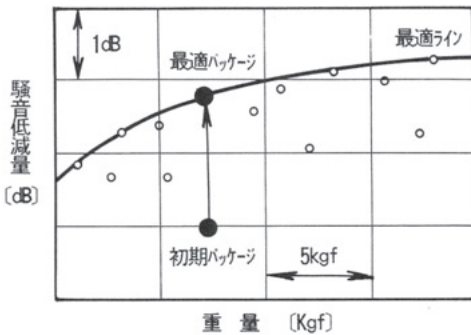


図 12 性能・重量・コストマップ

音低減効果の位置付けが明確になり、また同時に限られた重量、コストの中で最高性能を示す最適ラインも得ることができる。この結果、例えば初期の防音材料仕様に対して同等の重量で性能を改善する性能重視型防音パッケージ、あるいは、同等の性能で防音材料軽減を目的とした軽量化防音パッケージなどニーズに合わせた防音材料パッケージを机上計算で提示することが可能となり、大幅なテスト期間の短縮も同時にはかることができる。

このシミュレーションの結果をもとに、初期の防音仕様と同等の重量、コストでの最適防音パッケージを実車に適用し、ロードノイズのレベル改善度を確認した。図 13 に、初期の防音仕様と最適防音仕様を適用した車について比較的粗い路面を走行した時の車室内騒音測定結果を示す。この結果より、走行時の車室内騒音は、全車速度域において約 2 dB 改善されていることがわかり、このシミュレーションソフトウェアの有効性が確認できた。

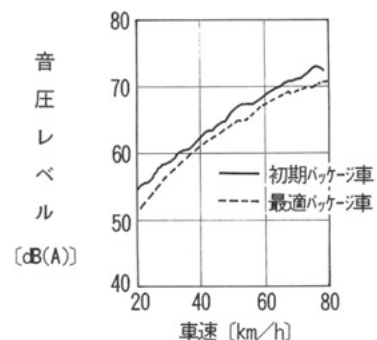


図 13 初期防音材料パッケージと最適化防音材料パッケージの走行時の車室内騒音比較

6. まとめ

防音材料の適用最適化を目的として、任意の防音パッケージに対する車室内騒音低減効果とその重量およびコストを予測計算できるシミュレーションソフトウェアを開発し、その結果、要求される性能、重量、コストに応じた最適な防音パッケージを短期間で決定することが可能となった。

今後、さらに要求の高まる車体の軽量化と車室内の静粛性向上に対して、今回開発した防音材料の最適化技術の適用をはかっていくとともに、従来からの防音材料単体性能の向上に加え、完成車トータルとしての防音材料および防音構造のあるべき姿に対する研究が必要と思われる。

参考文献

- (1) R. H van Ligten: Optimization of MF/HF sound packages, procedures and results, 7th Unikeller Conference, 1981
- (2) A. Chappuis: The effects of sound absorbing treatments applied in the passenger compartment of an automobile, 7th Unikeller Conference, 1981
- (3) O. Weibel: The optimization of the acoustic treatment of the vehicle using simulation techniques, 8th Unikeller Conference, 1987

■ 著 者 ■



小 峰 徳 雄



前 田 孝 司



山 下 剛



中 村 光 勇